



MODELO CIRCUITAL DE CÉLULAS SOLARES DE PELÍCULA DELGADA

Alcides Muñoz Lasso

Universidad de Panamá, Facultad de Ciencias Naturales, Exactas y Tecnología,
Departamento de Física y Centro de Investigación con Técnicas Nucleares
e-mail: alcides_up@yahoo.com

RESUMEN

Este trabajo se refiere a las características y criterios de elaboración de las células solares así como al tipo de estructura más utilizada para las células de a-Si:H y las razones para el uso de las mismas. Igualmente, se indican los parámetros característicos que se definen en una célula, tales como: corriente de corto circuito I_{sc} , voltaje de circuito abierto V_{oc} , factor de forma FF, eficiencia η resistencias de circuito abierto R_{oc} y resistencia de corto circuito R_{sc} . Se repasa el comportamiento de una célula solar a través de un circuito equivalente. En este circuito se incluye un elemento que representa las pérdidas por recombinación en la célula. A partir del circuito equivalente, damos la interpretación física de los parámetros característicos y de las constantes que intervienen en el funcionamiento de una célula. De los resultados, proponemos utilizar el método VIM (Variable Illumination Measurement) de Merten, que permite la medición y análisis de los parámetros más significativos de una célula solar de una manera fácil y rápida.

PALABRAS CLAVES

Células solares, silicio amorfo hidrogenado a-Si:H, modelo circuital, corriente de corto circuito I_{sc} , voltaje de circuito abierto V_{oc} , factor de forma FF, eficiencia η , resistencia de circuito abierto R_{oc} , resistencia de corto circuito R_{sc} , método VIM.

INTRODUCCIÓN

Las células solares utilizan el efecto fotovoltaico. Los primeros materiales sólidos que mostraron una significativa dependencia luz-voltaje entre dos contactos fueron el selenio y posteriormente el

óxido cuproso, lo que indicó que los semiconductores podrían ser los materiales más adecuados para la conversión fotovoltaica. Su progreso tecnológico comienza en 1954, con el desarrollo de la unión *pn* de silicio, en los Laboratorios Bell. Un predecesor de las actuales células solares, que convertía luz en electricidad con una razonable eficiencia (Johnston, 1980; Takashi & Konagi, 1983; Möller, 1993). Casi coincidiendo con el comienzo de las tecnologías de las células solares de silicio se desarrollaron las primeras heterouniones de sulfuro de cobre/sulfuro de cadmio, las cuales establecieron las bases para la investigación de dispositivos de células solares de película delgada. Las primeras aplicaciones fueron a pequeña escala y su primer gran impacto lo alcanzaron con el advenimiento de las exploraciones espaciales. En 1958 se usó la primera célula solar de silicio en el espacio (Möller, 1993). A mediados de la década de 1970, a raíz de la crisis política del Oriente Medio y el embargo petrolero, las células solares se consideraron una alternativa a las fuentes de energía convencionales. Paralelamente los países industrializados reconocieron que las fuentes fósiles no son inagotables. Los esfuerzos realizados en la investigación mejoraron la eficacia y bajaron los costos energéticos de producción. Desde comienzo de 1980, nuevos materiales para células solares y conceptos muy innovadores para varios dispositivos han sido probados y evaluados en plantas de producción piloto. En la actualidad se siguen ensayando nuevos materiales y dispositivos de células solares, pero todas las investigaciones coinciden en que es en la comprensión de los mecanismos físicos donde está la clave para alcanzar los mejores rendimientos y su posterior aplicación a escala industrial.

Parámetros Característicos de las Células Solares

Las células solares pueden caracterizarse funcionalmente a partir de la curva, corriente-vs-voltaje $I(V)$, figura 1. La respuesta $I(V)$ queda definida básicamente por siete parámetros a saber: tensión en circuito abierto V_{oc} , corriente en cortocircuito I_{sc} , factor de forma FF, eficiencia η , punto de potencia máxima V_{mp}, I_{mp} ($P_{mp} = V_{mp}I_{mp}$) y pendiente a cortar los ejes, R_{sc} y R_{oc} (Möller, 1993).

El voltaje de circuito abierto V_{oc} se define por la condición

$$I(V_{oc}) = 0 \quad (1)$$

Este es el voltaje de la célula cuando no fluye corriente. Otro parámetro es la corriente de cortocircuito I_{sc}

$$I_{sc} = |I(V = 0)| \quad (2)$$

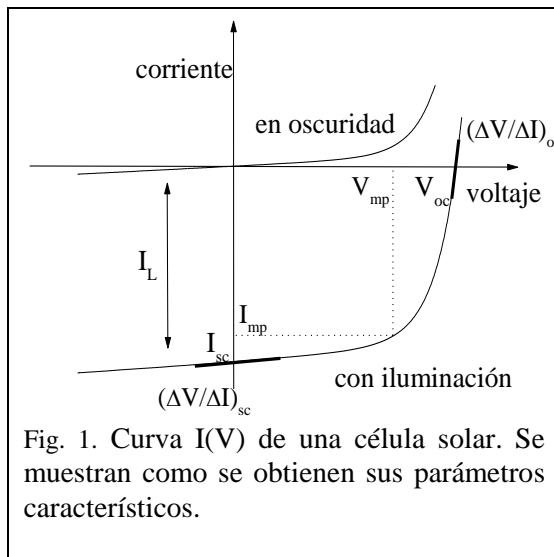
Es la corriente de la célula sin caída de voltaje en sus terminales. La corriente de cortocircuito I_{sc} para efectos prácticos puede considerarse proporcional a la luz absorbida en la célula (Merten, J. 1996).

Otro parámetro es el factor de forma (*Fill Factor*) FF que describe la desviación de la curva $I(V)$ de la forma rectangular:

$$FF = \frac{V_{mp} I_{mp}}{V_{oc} I_{sc}} \quad (3)$$

La eficiencia η de una célula es:

$$\eta = \frac{P_{mp}}{P_o} = \frac{FF \cdot V_{oc} \cdot I_{sc}}{P_o} \quad (4)$$



Donde P_{mp} es la potencia máxima que provee la célula y P_o es la radiación incidente en la célula. Los dos parámetros V_{mp} e I_{mp} son importantes para el diseñador de generadores solares, ya que las cargas conectadas a los paneles solares deben adaptarse, en impedancia, para permitir que trabajen en el punto de potencia máxima P_{mp} :

$$P_{mp} = V_{mp} I_{mp} \quad (5)$$

Los dos últimos parámetros característicos se refieren a la pendiente inversa de la curva $I(V)$ en condiciones de corto circuito y circuito abierto:

$$R_{sc} = \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I} \right)_{sc} \quad (6)$$

$$R_{oc} = \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I} \right)_{oc} \quad (7)$$

Células Solares con Estructura p-i-n

En una célula solar los procesos más importantes que intervienen en la generación fotovoltaica son:

- Absorción de luz y generación de pares de portadores electrón-hueco.
- Separación y colección de los portadores por el campo eléctrico de la unión.

Puesto que sus cargas son opuestas, electrones y huecos pueden ser separados por un campo eléctrico y colectados en los contactos, dando lugar a una fotocorriente, sí éstos se conectan externamente.

Las células solares de silicio se han beneficiado de los avances de la tecnología de semiconductores al usar las estructuras de estos dispositivos, tales como: la homounión pn del diodo (es la más ampliamente usada), unión metal semiconductor (diodos Schottky) o metal-aislante-semiconductor (MIS). La fabricación de células requiere el depósito de capas semiconductoras (amorfás o cristalinas) sobre sustratos de vidrio, cerámica, metal, plástico u otro semiconductor. Diferentes técnicas desarrolladas en la industria de la microelectrónica se usan actualmente, como por ejemplo: evaporación, depósito químico en fase vapor (CVD), epitaxia por haces moleculares (MEB), o pulverización catódica (Sputtering), teniéndose una gran flexibilidad en la formación de la película semiconductora en su composición y eficiencia (Johnston, 1980; Takashi & Konagi, 1983; Möller, 1993).

La alta concentración de defectos en el a-Si:H dopado requiere un diseño diferente de los dispositivos en relación con los cristalinos. A diferencia de las uniones pn usadas en casi todas las células solares, el

a-Si:H usa siempre una estructura *pin*. La fotogeneración se produce en la zona intrínseca, mantiene un campo eléctrico importante y favorece la colección de portadores por arrastre. En las células solares de c-Si la colección no es un problema, ya que la longitud de difusión de los portadores minoritarios L_{diff} es lo suficientemente grande para que éstos sean transportados por difusión a la unión, donde la separación entre huecos y electrones tiene lugar gracias al campo interno en la región de vaciado. Esta región de vaciado es típicamente mucho más delgada que el grosor total de la célula y el campo eléctrico se extiende sobre esta región muy delgada. El silicio amorfo, en contraste, tiene unas propiedades de transporte relativamente pobres: Baja movilidad μ y una vida media de portadores τ corta. La longitud de difusión es

$$L_{diff} = \sqrt{D\tau} = \sqrt{\frac{k_B T}{q} \mu \tau} \quad (8)$$

la cual es muy pequeña, en el mejor material intrínseco es aproximadamente $0,2 \mu\text{m}$. Por consiguiente, la colección es un problema en las células solares de silicio amorfo; la difusión sola no es suficiente como mecanismo de transporte, debido a la necesidad de que la mayor parte de los portadores libres no recombinen dentro de la célula. Esto hace imperativo tener un transporte por arrastre, basado en un campo eléctrico E extendido en la mayor parte de la célula, sobre todo en la capa-i. La longitud de arrastre L_{drift} en una capa-i (intrínseca) es bastante general,

$$L_{drift} = \mu\tau E = \mu\tau \frac{V_{bi}}{d_i} \quad (9)$$

donde V_{bi} es el voltaje de construcción y d_i el grosor de la capa-i.

Si definimos un parámetro κ de modo que $\kappa = L_{drift}/d_i$ y suponemos que $V_{bi} \sim 1$ y calculamos la razón

$$\frac{L_{drift}}{L_{diff}} = \sqrt{\frac{V_{bi}}{\left(\frac{k_B T}{q}\right)} \frac{1}{\kappa}} \cong \sqrt{\frac{40}{\kappa}} \quad (10)$$

Para un $\kappa \leq 0,5$ (lo cual es razonable para obtener una colección satisfactoria), se obtiene que la longitud de arrastre es aproximadamente un factor 10, o mayor que la longitud de difusión, lo que hace que el mecanismo de arrastre sea dominante en el transporte en las células de silicio amorfo.

Es bien conocido que uno de los principales problemas del silicio amorfo tiene que ver con los defectos inducidos por luz (efecto Staebler-Wronski, SWE), los cuales producen la degradación de las propiedades de transporte del semiconductor. Su conocimiento es un tópico de gran importancia para alcanzar un material estable en el campo de los semiconductores amorfos, para aplicaciones optoelectrónicas (Shah, Plastz & Keppner, 1995; Vieira & colaboradores, 1996; Wronski, 1996; Staebler & Wronsky, 1977; Yang, Chen & Catalano, 1991). La recombinación de exceso de portadores libres creados por la iluminación o por inyección de corriente causa la formación de nuevos enlaces no saturados (*dangling bonds*), que actúan como nuevos centros de recombinación adicionales, afectando así la vida media de los portadores. A su vez, los centros cargados afectan la distribución del campo eléctrico y actúan como centros de recombinación. Este proceso de formación de defectos es reversible, si uno calienta el semiconductor durante un cierto tiempo a temperatura moderada, aproximadamente 180° C. Afortunadamente, este proceso se limita a sí mismo y la eficiencia de la célula se estabiliza a un valor menor que la eficiencia inicial después de un cierto tiempo (Shah, Plastz & Keppner, 1995; Vieira & colaboradores, 1996; Wronski, 1996; Yang, Chen & Catalano, 1991; Sze, 1995).

De la ecuación 9 vemos que la evaluación del producto $\mu\tau$, movilidad-vida media, es un buen indicador de la eficiencia de colección de portadores (Vieira & colaboradores, 1996). La concentración final de defectos en la capa-i es el resultado de un equilibrio entre los defectos inducidos por luz y su recuperación térmica. Igualmente, existe una correlación entre el decrecimiento del producto $\mu\tau$ para el electrón y el incremento de la fracción de enlaces de hidrógeno en la superficie interna, sugiriendo cambios estructurales durante el proceso de degradación. La disminución del funcionamiento del dispositivo (J_{sc} , FF, η) está determinada por la formación de defectos en la capa-i,

mientras la disminución en el V_{oc} parece ser más dependiente del campo eléctrico en la interfaz p/i (Vieira & colaboradores, 1996).

Las primeras células solares de a-Si:H elaboradas con estructura *pin* las hizo Carlson en 1977. Sobre un sustrato de vidrio recubierto por un electrodo transparente, típicamente SnO_2 , se crecía una capa *p* de unos pocos centenares de angstroms de a-Si:H,B, una intrínseca de a-Si:H de aproximadamente $1\mu\text{m}$ y se acababa con una capa *n* a-Si:H,P de algunos centenares de angstroms. Los rendimientos no eran muy altos (5,5%) y tampoco eran demasiado buenos los valores correspondientes al voltaje de circuito abierto V_{oc} y el factor de forma FF (0,5 y 0,4, respectivamente) (Takashi & Konagi, 1983).

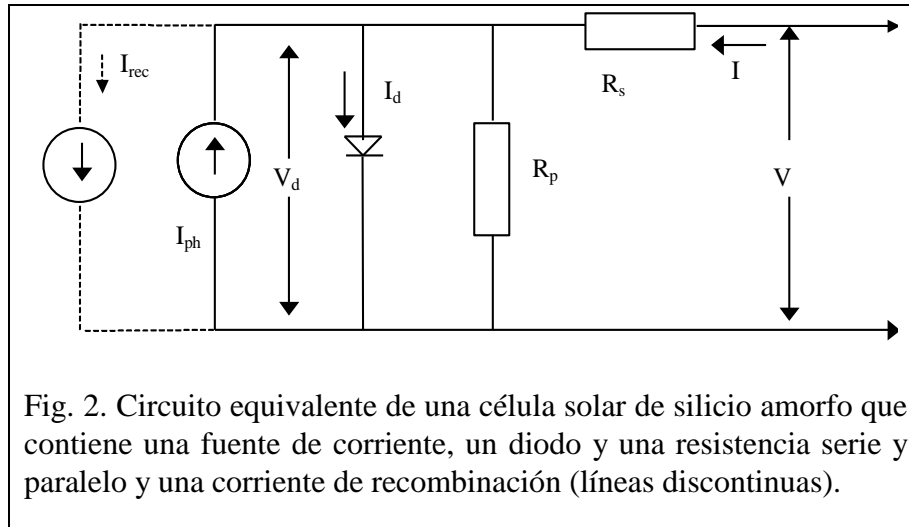
Método de análisis de las células solares de película delgada.

Circuito Equivalente para una célula solar

La curva característica I(V) de una célula solar puede ser descrita mediante el circuito equivalente de la figura 2 (líneas continuas) (Johnston, 1980; Takashi & Konagi, 1983; Möller, 1993). La fotocorriente I_{ph} se representa por una fuente de corriente conectada en paralelo a un diodo y a una resistencia R_p . En serie, se tiene otra resistencia R_s por la que circula la corriente total. La ecuación del circuito total se puede escribir como:

$$I(V) = -I_{ph} + I_o \left(\exp\left(\frac{V - IR_s}{nk_B T / e}\right) - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} \quad (11)$$

Donde k_B es la constante de Boltzmann, T la temperatura absoluta de la célula y e la carga del electrón. El último término de la ecuación 11 representa la pérdida de corriente sobre la resistencia paralelo R_p (I_{fug}) y el segundo, la corriente de pérdida interna del diodo (I_{dio}). El diodo es tratado como un diodo ideal con una corriente de saturación I_o y un factor de idealidad n . Para un diodo ideal *pn* de silicio cristalino, el factor n es igual a uno. Se aproxima a dos cuando las corrientes de recombinación dominan (Möller, 1993).



Notemos que en modo fotovoltaico la corriente I es negativa de manera que el voltaje que cae sobre la unión $V - IR_s$ es mayor que el voltaje V que se obtiene entre sus terminales. Se supone que la fotocorriente generada I_{ph} depende linealmente del número de fotones absorbidos. Así como en las células cristalinas (colectan por difusión) puede considerarse que la fotocorriente no depende de la tensión aplicada, en las amorfas (colectan por arrastre) debe haber dependencia con el campo eléctrico y, por tanto, con la tensión.

Como mencionamos anteriormente, los parámetros característicos de una célula solar V_{oc} , FF , R_{oc} y R_{sc} se obtienen a partir de los valores ideales de la curva $I(V)$. Pero la existencia de algunos factores de pérdida (corrientes de recombinación), tales como corrientes de fuga laterales a lo largo de la capa-n, los “*pinholes*” y la suposición de que la corriente fotogenerada es independiente del voltaje, hace que los resultados experimentales no concuerden del todo con los que se obtienen de la curva $I(V)$ para una célula solar. La principal diferencia de aplicar este modelo a las células de silicio amorfo es suponer que la fotocorriente I_{ph} colectada en la célula es independiente del voltaje aplicado. Como la longitud de difusión es pequeña en el silicio amorfo, los portadores son colectados por un campo eléctrico. Cuando

el campo eléctrico es débil, los portadores tienen pérdidas por recombinación. Así la fotogeneración de corriente viene a ser dependiente del campo y el ajuste de las curvas I(V) de células solares de silicio amorfo no concuerdan del todo con los resultados experimentales tal como el valor del factor de forma y la resistencia de corto circuito.

Al incluir el término de corrientes de pérdida (Merten, 1996) en la ecuación de corriente-voltaje, representado por el elemento conectado por líneas discontinuas de la figura 2, se obtiene una mejor concordancia con los resultados experimentales de la variación de la radiación de la curva I(V) para las células de silicio amorfo. Por todo lo mencionado anteriormente, podemos establecer intuitivamente que esta corriente de pérdida es proporcional a una fracción de I_{ph} de manera que una fracción X de la corriente fotogenerada no puede extraerse del dispositivo. Así pues,

$$\begin{aligned}
 I &= -I_{ph} + I_{dio} + I_{fug} + I_{rec}, \\
 I &= -I_{ph} + I_{dio} + I_{fug} + XI_{ph}, \\
 I &= -(1 - X)I_{ph} + I_{dio} + I_{fug}
 \end{aligned}
 \tag{12}$$

En cuanto al parámetro X, éste puede estimarse en función del grosor de la zona intrínseca d y de una longitud de arrastre promedio L_{eff} representativa de electrones y huecos. La fracción que recombina será tanto mayor cuanto menor sea la relación entre la longitud de arrastre y el grosor de la zona intrínseca. Tengamos en cuenta que L_{eff} representa el camino que puede recorrer un portador arrastrado por el campo eléctrico antes de recombinar. Así pues, para $L_{eff} \geq d$ tendremos

$$X \approx \frac{d}{L_{eff}}.
 \tag{13}$$

Pero, por definición, L_{eff} es proporcional al campo eléctrico E a través de una constante C, (que es proporcional a $\mu\tau$) de manera que

$$L_{eff} = C \cdot E = \frac{C[V_{bi} - (V - IR_s)]}{d};
 \tag{14}$$

por lo que

$$X = \frac{1}{C} \cdot \frac{d^2}{[V_{bi} - (V - IR_s)]}; \quad (15)$$

o si se quiere

$$X = \frac{1}{A - B(V - IR_s)}, \quad \text{con } A = \frac{d^2}{CV_{bi}} \text{ y } B = \frac{d^2}{C}; \quad (16)$$

ahora, si escribimos nuevamente la ecuación 11 utilizando la ecuación 12, podremos expresar una relación más general para las células solares, donde se consideran los efectos debido a las corrientes de pérdida por recombinación:

$$I(V) = -I_{ph} + I_o \left(e^{\frac{V - IR_s}{nk_B T}} - 1 \right) + \frac{V - IR_s}{R_p} + I_{ph} \frac{1}{A - B(V - IR_s)}; \quad (17)$$

Es necesario recordar que los parámetros A y B están relacionados con la movilidad μ , tiempo de captura τ de electrones y huecos, voltaje de construcción y con el grosor de la capa-i (Merten, 1996; Merten & colaboradores, 1998).

Si utilizamos la condición de la ecuación 1 en la ecuación 17, zona no afectada por la resistencia serie y paralelo, podremos obtener el voltaje de circuito abierto V_{oc} :

$$I(V_{oc}) = -I_{ph} + I_o \left[e^{\left(\frac{eV_{oc}}{nk_B T} \right)} - 1 \right] + I_{ph} \frac{1}{A - BV_{oc}} = 0 \quad (18)$$

$$0 = I_{ph} \left(-1 + \frac{1}{A - BV_{oc}} \right) + I_o \left[e^{\left(\frac{eV_{oc}}{nk_B T} \right)} - 1 \right]; \quad (19)$$

En condiciones de corto circuito, tenemos que

$$I_{sc} = I_{ph} \left(-1 + \frac{1}{A} \right); \quad (20)$$

Restando la ecuación 20 a la 19, nos queda que

$$I_{sc} = I_0 \left[e^{\left(\frac{eV_{oc}}{nk_B T} \right)} - 1 \right] + I_{ph} \cdot \frac{BV_{oc}}{(A - BV_{oc}) \cdot A}; \quad (21)$$

El segundo término del miembro derecho de la ecuación 21 se puede despreciar para células con poca recombinación y aproximando el primero podemos escribir

$$\ln(I_{sc}) = \ln(I_0) + \frac{eV_{oc}}{nk_B T}; \quad (22)$$

resolviendo para V_{oc} , obtenemos,

$$V_{oc} = \frac{nk_B T}{e} \ln \left(\frac{I_{sc}}{I_0} \right) \quad (23)$$

La ecuación 23 nos muestra una dependencia logarítmica de V_{oc} con la corriente de corto circuito I_{sc} , y la pendiente del comportamiento de $V_{oc}(I_{sc})$ puede ser usada para determinar el factor de calidad n y la corriente de saturación I_0 . Para niveles de iluminación bajos, el efecto de la resistencia paralelo no es despreciable y lleva a una reducción muy importante del voltaje de circuito abierto. A una irradiancia alta, el V_{oc} tiende a no ser afectada por R_p .

Si nuevamente tomamos la ecuación 17 y aplicamos las condiciones de las ecuaciones 6 y 7 se obtendrá las resistencias de corto circuito y circuito abierto. La resistencia $(\partial V / \partial I)$ de la célula solar (fig.2.) consiste en una resistencia serie con una conexión paralelo de: la resistencia paralelo R_p , la resistencia del diodo ideal $(\partial V / \partial I)_{\text{diodo}}$, la resistencia de la fuente de corriente $(\partial V / \partial I)_{\text{ph}}$ y la resistencia de la

corriente de recombinación $(\partial V/\partial I)_{rec}$. La resistencia de la corriente se considera una dependencia de la fotocorriente con la tensión. De esta manera, la resistencia para la célula solar es (Merten, 1996):

$$\left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I}\right) = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{I_o}{nkT/e} \exp\left(\frac{V - IR_s}{nkT/e}\right) + \frac{\partial I_{ph}}{\partial \mathcal{V}} + \frac{\partial I_{rec}}{\partial \mathcal{V}}} \quad (24)$$

En condiciones de circuito abierto, con la corriente fotogenerada que no depende del voltaje ($I_{ph}(V) = \text{constante}$), la resistencia de la fuente de corriente es infinita, la corriente de recombinación pequeña y la corriente es cero, la resistencia R_{oc} es:

$$R_{oc} = \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I}\right)_{oc} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{I_o}{nkT/e} \exp\left(\frac{eV_{oc}}{nKT}\right)} \quad (25)$$

En el límite de una irradiancia baja, la resistencia paralelo viene a ser dominante y obtenemos con $R_p \ll nkT/eI_o$:

$$\lim_{V_{oc} \rightarrow 0} R_{oc} = \lim_{V_{oc} \rightarrow 0} \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I}\right)_{oc} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{I_o}{nkT/e}} \approx R_p \quad (26)$$

Para valores de irradiancia altos, la resistencia del diodo viene a ser importante y puede ser que $R_p \gg (nkT/eI_o) e^{(-V_{oc}/nkT/e)}$:

$$R_{oc} = \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I}\right)_{oc} = R_s + \frac{nk_B T}{eI_o} \exp\left(\frac{-V_{oc}}{nk_B T/e}\right) \quad (27)$$

En el límite de una irradiancia muy alta, la expresión de R_{oc} en la ecuación (27), finalmente se aproxima a la resistencia serie R_s de la célula:

$$\lim_{V_{oc} \rightarrow \infty} R_{oc} = R_s \quad (28)$$

Para determinar la resistencia serie R_s tenemos que incrementar la irradiancia hasta poder determinar el valor asintótico de R_{oc} (asíntota horizontal).

En condiciones de corto circuito de la ecuación 17 tenemos,

$$\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I} = R_s + \frac{1}{\frac{1}{R_p} + \frac{I_o}{nkT/e} \exp\left(\frac{V - IR_s}{nkT/e}\right) + \frac{\partial I_{ph}}{\partial \mathcal{V}} + \frac{\partial I_{rec}}{\partial \mathcal{V}}} \quad (29)$$

a una alta iluminación el término del diodo es determinante y la recombinación es despreciable, por lo que

$$\lim_{I_{sc} \rightarrow \infty} \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I} \right)_{sc} = \lim_{I_{sc} \rightarrow \infty} R_s = R_s \quad (30)$$

a baja iluminación la resistencia paralelo es determinante y podemos escribir la ecuación 29 como,

$$R_{sc} = \left(\frac{\partial \mathcal{V}}{\partial I} \right)_{sc} = R_s + R_p \approx R_p \quad (31)$$

La aproximación usada es válida para un amplio intervalo de irradiancias y produce un valor constante para R_{sc} . En la región donde no afecta la resistencia paralelo y serie (región media de iluminación) la recombinación no se puede despreciar y la resistencia de corto circuito se escribe,

$$R_{sc} = \frac{A^2}{B} \cdot \frac{1}{I_{ph}} \quad (32)$$

El resultado que se obtiene de la ecuación 32 nos ofrece una forma de medir los cambios que pueden sufrir un dispositivo debido a las recombinaciones en la capa-i del dispositivo (Merten, 1996; Merten & colaboradores, 1998; Hubin & Shah, 1995).

Interpretación Física del Circuito Equivalente

De los resultados obtenidos se establece un método que permite determinar los parámetros de una célula solar. Primeramente se deben medir curvas de I(V) para varios niveles de iluminación. (figura 3). Variando los niveles de iluminación se obtiene más información acerca de la célula y se distinguen fácilmente los efectos de la resistencia externa paralelo y serie y los efectos de la unión *pin*.

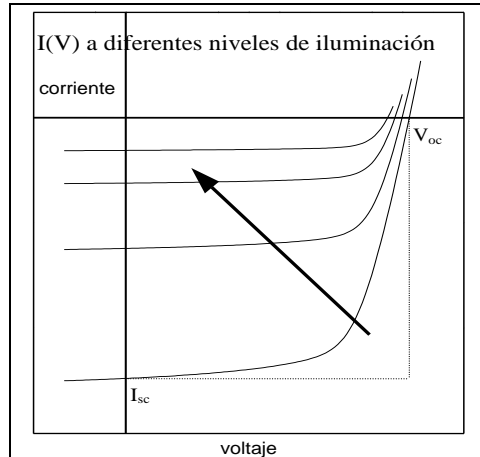


Fig. 3. Curvas I(V) a diferentes niveles de iluminación. De las medidas de la curvas I(V) se extraen los parámetros V_{oc} , I_{sc} , FF, R_{sc} , R_{oc} .

Este método de caracterización, propuesto por (Merten, 1996) es conocido por sus siglas en inglés como VIM (Variable Illumination Measurement). Es un método simple que permite dar información

sobre la tecnología de elaboración y física del dispositivo estudiado. Niveles bajos de iluminación, permiten una buena determinación de la resistencia paralelo R_p .

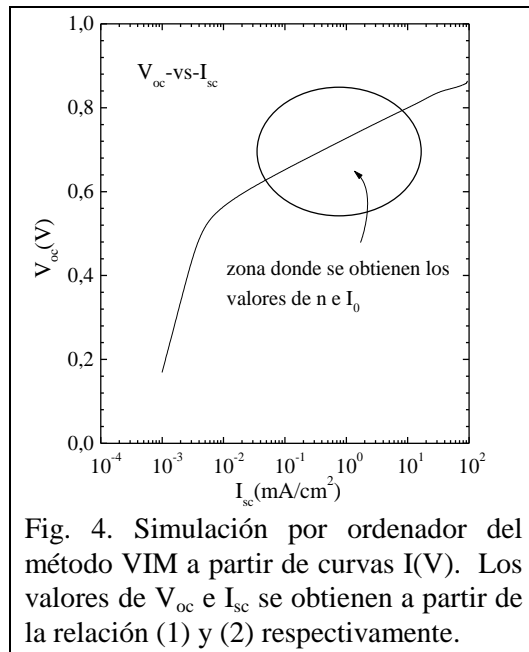


Fig. 4. Simulación por ordenador del método VIM a partir de curvas I(V). Los valores de V_{oc} e I_{sc} se obtienen a partir de la relación (1) y (2) respectivamente.

Una irradiancia alta es necesaria para determinar la resistencia serie R_s . De las medidas de las curvas I(V), se extraen los parámetros característicos, V_{oc} , I_{sc} , FF, η , incluyendo los valores de R_{oc} y R_{sc} .

Así los valores del V_{oc} , (figura 4) proporcionan una idea de la recombinación en la superficie; una disminución del V_{oc} está relacionada con el campo eléctrico en la interfaz p/i. El factor de calidad n y la corriente de saturación I_0 , ecuación 23, nos indican sobre los estados de recombinación de los pares electrones-huecos a través de los centros de impurezas en el volumen o de los defectos extendidos; un aumento del factor de calidad n , muestra el aumento de defectos; un aumento de I_0 disminuye el voltaje de circuito abierto V_{oc} .

La obtención del factor de forma FF se hace a partir de la ecuación 3. La disminución de FF está determinada por la formación de defectos en la capa-i. El factor de forma (*fill factor*) FF mostrado en la figura 5

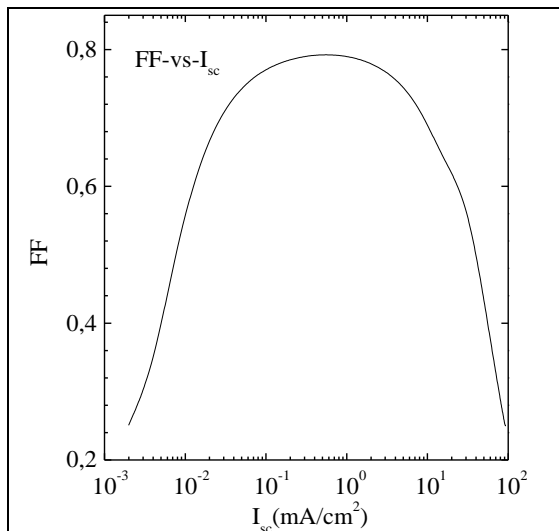


Fig. 5. Simulación del método VIM por ordenador. Los valores de FF se obtiene de la relación (3).

está limitado por la resistencia paralelo R_p en el límite de una irradiancia baja. Lo mismo pasa en el límite de alta irradiancia donde la resistencia serie R_s limita el factor de forma. Por consiguiente, el factor de forma de una célula solar representada como una función de la irradiancia tiene un valor máximo. La eficiencia de una célula es proporcional al producto ($V_{oc} I_{sc} FF$) (Johnston, 1980; Takashi &

Konagi, 1983; Möller, 1993). En el intervalo de I_{sc} en que domina la ecuación del diodo (intervalo medio), I_{sc} es proporcional a la iluminación, V_{oc} aumenta logarítmicamente con I_{sc} ; por tanto el rendimiento aumenta. Este incremento del rendimiento, al aumentar la iluminación, se mantiene hasta que el efecto de la resistencia serie o de una recombinación incrementada, produce la disminución del factor de forma, (ver figura 5). El estudio del comportamiento del factor de forma a alta iluminación es especialmente importante para las células que se incorporan a los concentradores solares. Estas células presentan

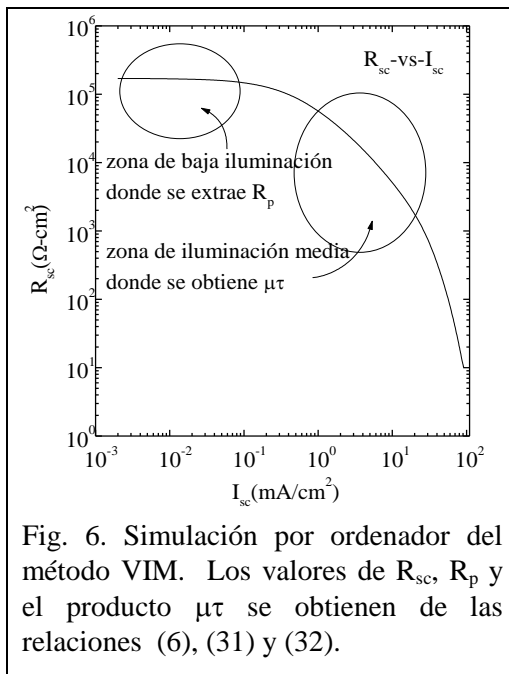


Fig. 6. Simulación por ordenador del método VIM. Los valores de R_{sc} , R_p y el producto $\mu\tau$ se obtienen de las relaciones (6), (31) y (32).

mejor rendimiento que las células solares sin concentración sí se evita el efecto de disminución del FF a alta iluminación y el efecto de calentamiento de la célula.

El R_{sc} nos permite obtener el valor de la resistencia paralelo, R_p a bajos niveles de iluminación (figura 6); éste guarda relación con la formación de “pinholes” o “microcracks” (en la formación de la unión de la capa), defectos extendidos de la red (dislocaciones, frontera de grano,

precipitados grandes, por ejemplo) en la región de vaciado o corrientes de fuga alrededor de los bordes de la célula, los cortocircuitos en la metalización de los contactos alrededor de la unión. El valor del producto $\mu\tau$ obtenido de R_{sc} , (figura 6) nos da un entendimiento de los portadores a través de la capa-i y el transporte de portadores a través de la interfaz p/i.

El R_{oc} , (figura 7), nos permite calcular el valor de la resistencia serie, R_s a alta iluminación el cual guarda relación con la resistencia de los contactos (contacto óhmico e interconexiones) y la resistencia del volumen del semiconductor.

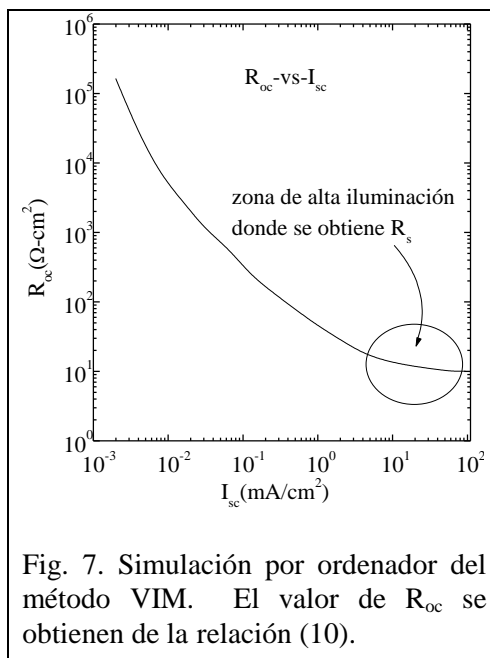


Fig. 7. Simulación por ordenador del método VIM. El valor de R_{oc} se obtienen de la relación (10).

CONCLUSIONES

El modelo propuesto, usando el método VIM, permite diferenciar las características que presentan las células solares *pin* a través de sus parámetros característicos, así como las limitaciones que presenta el dispositivo. La utilización de esta técnica es una manera rápida y fácil de estudiar el comportamiento de las células solares.

Necesitamos hacer algunas observaciones con la inclusión de las corrientes de recombinación (pérdida) en la capa-i en la ecuación 17:

- * El valor de R_{oc} calculado con el modelo modificado no muestra un cambio con el término introducido.
- * El término adicional no es efectivo a niveles de iluminación bajos y el valor de R_{sc} viene dado por la resistencia paralelo R_p .
- * Por otra parte es importante que para la efectividad del modelo, las curvas de $I(V)$ deben ser medidas en varios niveles de iluminación. El límite de iluminación menor conduce a las corrientes de cortocircuito I_{sc} . Esto es importante para una buena determinación de la resistencia paralelo R_p . El límite superior está determinado por las restricciones experimentales, ya que se necesita una irradiancia alta para determinar la resistencia serie R_s . (Merten, 1996).

ABSTRACT

This article deals primarily with solar cells, their features and manufacturing criteria, the most utilized type of structure for solar cells made out of amorphous silicon (a-Si:H), as well as the reasons for their utilization. Likewise, we indicate the characteristic parameters defined in a cell, such as: short-circuit current I_{sc} , open-circuit voltage V_{oc} , fill factor FF, efficiency η and open-circuit resistance R_{oc} , as well as short-circuit resistance R_{sc} . The behavior of a solar cell by an equivalent circuit is explained. In this circuit an element is included that represents the losses by recombination in the cell. As of the equivalent circuit, it carries out a physical interpretation of the characteristic parameters, as well as the constant that intervene in the cell's operation. Of the basic of the results, the VIM (Variable Illumination Measurement) method is proposed, a method that allows for an easy and quick measurement and analysis of a solar cell.

REFERENCIAS

Hubin, J. & A.V. Shah. 1995. Effect of recombination function on the collection in a p-i-n solar cell, *Philos. Mag. B*;72(2) 589-599.

Johnston, W.D. 1980. *Solar Voltaic Cells*, Marcel Dekker INC.334 pp.
Tecnociencia, Vol. 5, N°1 49

Merten, J. 1996. Photovoltaics with Amorphous Silicon: Technological, Physical and Technical Aspects. *Tesis Doctoral, Universidad de Barcelona, España.*

Merten, J., J.M. Asensi, C. Voz, A. Shah, R. Platz & J. Andreu. 1998. Improved Equivalent Circuit and Analytical Model for Amorphous Silicon Solar Cells and Modules. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 45(2) 423-429.

Möller, H. J. 1993. *Semiconductors for Solar Cell*, The Artech House. 587 pp.

Shah, A.V., R. Platz & H. Keppner. 1995. Thin-Film silico solar cells; A review and select trends. *Solar Energy Materials and Solar Cells* 38 501-520.

Staebler D.L. & C.R. Wronsky. 1977. Reversible conductivity changes in discharge-produced amorphous silicon. *Appl. Phys. Lett.* 31 292-294.

Sze, S. M. 1995. *Semiconductor devices, physics and technology.* Wiley & Sons. 486 pp.

Takahashi, K. & M. Konagi. 1983. *Amorphous Silicon Solar Cells*, North Oxford Academic. 478 pp.

Vieira, M., E. Fortunato, G. Iavareda, C. N. Carvalho & Martins, R. 1996, Light and temperature effect on pin a-Si:H device performance. *Vacuum*, 45 (10/11) 1147-1149.

Wronski, C. R. 1996. Amorphous silicon technology: Coming of age. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 41/42 427-439.

Yang, L., L. Chen & Catalano, A. 1991., Intensiva and temperature dependence of photodegradation of amorphous silicon solar cells under intense illumination., *Appl. Phys. Lett.*, 59 840-842.

Recibido noviembre del 2001, aceptado septiembre del 2002.